

순환 지연 다이버시티를 사용하는 OFDM 시스템을 위한 선형 프리코딩 기법

준회원 휘 빙*, 김 영 범*, 종신회원 장 경 희*

A Linear Precoding Technique for OFDM Systems with Cyclic Delay Diversity

Bing Hui*, YoungBum Kim* *Associate Members,*
KyungHi Chang* *Lifelong Member*

요 약

순환 지연 다이버시티(CDD, cyclic delay diversity) 기법은 주파수 다이버시티를 이용하여 OFDM 시스템의 성능을 향상시키는 기법이다. 또한, 선형 프리코딩 기법은 채널 상황 정보(CSI, channel state information)를 이용하여 통신 시스템의 성능을 크게 증가시킬 수 있는 기법이다. 본 논문은 기존의 CDD-OFDM 송신 다이버시티 기법보다 향상된 성능을 얻기 위하여 선형 프리코딩 기법의 적용을 제안한다. 제안된 기법은 채널 상황 정보 feedback이 필요한 FDD(frequency division duplex) 시스템 보다, feedback을 사용할 필요 없이 채널 가역성(reciprocity)의 성질을 이용할 수 있는 TDD(time division duplex) 시스템에서 더욱 효과적이다. 모의실험 결과를 통해 본 논문에서 제안된 기법이 기존의 프리코딩을 사용하지 않는 CDD-OFDM 시스템에 비하여 target BER 10^{-4} 에서 3km/h의 이동성(mobility)을 갖는 flat 페이딩 채널과 Pedestrian A(Ped A) 채널, 120km/h의 이동성을 갖는 flat 페이딩 채널과 Vehicular A(Veh A) 채널에서 각각 6.3dB, 6.2dB, 2.8dB, 3.8dB의 SNR 성능 이득을 얻는 것을 보인다.

Key Words : Cyclic Delay Diversity, Linear Precoding, OFDM, Reciprocity, FDD , TDD

ABSTRACT

Cyclic delay diversity (CDD) is considered a simple approach to exploit the frequency diversity, to improve the system performance in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. Also, the linear precoding technique can significantly improve the performance of communication systems by exploiting the channel state information (CSI). In order to achieve enhanced performance, we propose applying linear precoding to the conventional CDD-OFDM transmit diversity schemes over Rayleigh fading channels. The proposed scheme works effectively with the accurate CSI in time-division-duplex (TDD) OFDM systems with CDD, where the reciprocity is assumed instead of channel state feedback. For a BER of 10^{-4} and the mobility of 3 km/h, simulation results show that a gain of 6 dB is achieved by the proposed scheme over both flat fading and Pedestrian A (Ped A) channels, compared to the conventional CDD-OFDM system. On the other hand, for a mobility of 120 km/h, a gain of 2.7 dB and 3.8 dB is achieved in flat fading and Vehicular A (Veh A) channels, respectively.

※ 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00296(100048)).

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실 (huibing_zxo@163.com, kimyb2000@hanmail.net, khchang@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-11-503, 접수일자 : 2008년 11월 3일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 27일

I. 서 론

OFDM은 주파수 선택적 채널을 여러 개의 주파수 flat 채널로 변환하는 변조 방식이므로 주파수 영역에서 1-tap equalizer를 사용하여 채널로 인한 영향을 쉽게 보상할 수 있다. 그러나 OFDM을 기반으로 하는 시스템들은 시스템 자체의 내부 다이버시티 기능이 없어 성능을 향상시키는데 어려움이 있다. 따라서 주파수 자원을 추가적으로 사용하지 않고 더 높은 신뢰도(reliability)와 유효성(availability)을 얻기 위하여 공간 다이버시티와 같은 여러 가지 다이버시티 기법들이 OFDM 시스템에 적용되고 있다.

지연 다이버시티(DD, delay diversity)는 하나의 신호를 각각 다른 값으로 지연시켜 서로 다른 안테나를 통해 전송하는 송신 다이버시티 기법으로, 수신측에서는 별다른 추가적인 연산없이 적용할 수 있다. 즉, 기존의 SISO(single-input single-output) OFDM에서 사용하던 수신기만으로 DD 기술을 사용할 수 있는 것이다. 하지만, DD-OFDM 시스템에서 허용 가능한 최대 지연은 CP(cyclic prefix)의 길이에 의해 크게 제한된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 [1]에 제안된 CDD 를 사용한다. CDD 기법이 STBC(space-time block codes)^[2]와 같은 다른 종류의 송신 다이버시티 기법과 비교했을 때 가지는 장점은 송신 안테나의 수가 많아지더라도 전송속도에 손실이 없다는 것이다.

통신 시스템은 송신측에서 채널에 대한 정보를 가지고 송신할 때 그 성능이 향상된다. 수신측으로부터 채널 상황 정보를 feedback 받아 채널 상황에 맞게 송신하는 선형 프리코딩 기법은 매우 간단하며 많은 시스템에서 사용되고 있다. 그러므로 본 논문은 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 기존의 CDD-OFDM 시스템에 선형 프리코딩 기법의 적용을 제안한다. 본 논문의 모의실험 결과는 제안된 기법이 낮은 복잡도(complexity) 만으로 매우 큰 성능의 향상을 가져오는 것을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 CDD 기법에 대해 간략히 소개하고, 3장에서는 MIMO (multiple-input multiple-output) 선형 프리코딩 기술에 대해 살펴본다. 4장에서는 CDD 에 선형 프리코딩을 적용한 제안된 기법에 대해 상세히 소개하고, 5장에서 모의실험 결과를 통해 성능을 분석한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 순환 지연 다이버시티의 원리

2.1 CDD-OFDM 시스템의 구조

CDD 기법은 낮은 복잡도를 가지는 공간 다이버시티 기법으로, 여러 개의 송신 안테나가 하나의 신호를 각각 다른 값으로 시프트시켜 송신한다. 순환되는 시프트로 인해, ISI(inter-symbol interference)를 피할 수 있고, 부분송파들 간의 직교성(Orthogonality) 이 유지될 수 있다. 여러 개의 안테나를 통해 송신 되는 MISO(multiple - input single - output) 채널은 selectivity가 증가된 하나의 SISO 채널로 전환된다. 즉, 공간 다이버시티가 주파수 다이버시티로 전환된 다는 것이다^[3].

그림 1 은 N개의 송신 안테나를 가지는 CDD-OFDM 시스템의 송신기 구조를 나타낸다. 우선, 정보가 담긴 비트를 FEC 인코더를 사용하여 인코딩하고, 버스트에러로 인한 성능의 열화를 막기 위해 인터리빙을 수행한다. 인터리빙 이후에 심볼 맵핑을 거친 뒤 N_{FFT} 크기의 IFFT(inverse fast fourier transform)를 사용하여 OFDM 변조(modulation)를 실행한다. 여기서 N_{FFT}는 부분송파의 개수를 의미한다. IFFT를 마친 신호들은 N 개의 송신 안테나로 보내진다. 첫번째 안테나의 시프트 값은 0로 정하고 나머지 안테나들은 δ_{cyc,n} (n=1, ..., N-1)의 주기적인 크기로 시프트 시킨다. 시간 영역에서 심볼들의 주기적인 시프트는 주파수 영역에서 위상 다이버시티(PD, phase diversity)를 얻게 된다. 각각의 지연된 신호들은 송신되기 전에 CP를 추가하게 된다.

PD와 CDD는 FFT(fast fourier transform)의 특성으로 동일성(equivalence)을 가진다. 송신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s(l) = \frac{1}{\sqrt{N_{FFT}}} \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} S(k) e^{j \frac{2\pi}{N_{FFT}} kl} \tag{1}$$

$$s((l - \delta_{cyc,n}) \bmod N_{FFT}) = \frac{1}{\sqrt{N_{FFT}}} \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} e^{-j \frac{2\pi}{N_{FFT}} k \delta_{cyc,n}} S(k) e^{j \frac{2\pi}{N_{FFT}} kl} \tag{2}$$

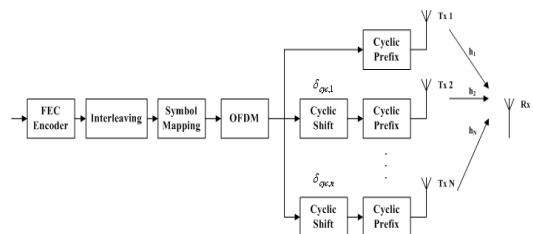


그림 1. CDD-OFDM 송신기 구조

여기서, $s(l)$ 과 $S(k)$ 는 각각 시간 영역과 주파수 영역에서의 복소수 값을 갖는 신호, k 와 l 은 각각 주파수와 시간의 인덱스를 나타낸다.

수신기에서는 CP를 제거하고 수신 신호를 합친 뒤 FFT를 실행한다. CDD를 사용하였기 때문에 수신 신호들은 SISO-OFDM 시스템에서의 multipath로 인한 신호들과 같은 형태를 보이게 된다. 따라서 기존의 SISO-OFDM 시스템의 수신기를 사용하는 것이 가능하다. 순환되는 시프트로 인한 위상 회전은 수신단의 equalizer를 사용하여 보상 가능하며, 채널 디코더는 인터리버를 사용함으로써 주파수 선택적인 페이딩 채널로 인한 다이버시티를 얻을 수 있다.

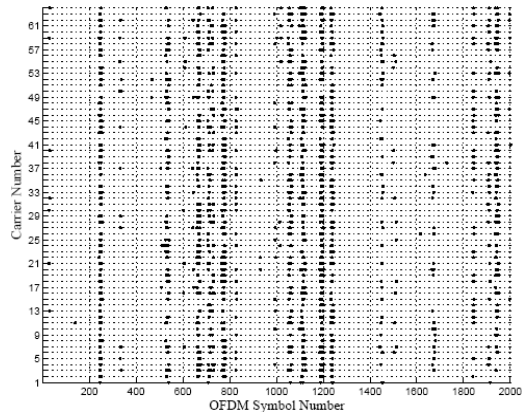
2.2 CDD-OFDM 시스템의 특성 분석

CDD-OFDM 시스템의 MISO 채널은 순환되는 시프트를 사용하기 때문에 가상의 SISO 채널로 전환될 수 있다. 이로 인해 채널의 주파수 selectivity가 증가하여 채널 코딩과 인터리빙을 사용할 때 더 좋은 시스템 성능을 얻게 된다. 사실상 순환되는 시프트로 인해 전체적인 에러 비트의 수를 감소시키는 것은 아니지만 에러의 분포를 변화시켜 채널 디코더의 성능을 향상시킬 수 있다. 순환 시프트를 사용한 송신 신호의 에러 비트들은 사용하지 않은 경우 보다 더욱 분산되어 분포하는 것을 볼 수 있다⁴⁾. 그림 2는 각각 flat 페이딩 채널 환경 하에서의 CDD를 사용한 시스템과 사용하지 않은 시스템의 에러 비트 분포를 나타낸다. 에러 비트 분포의 이러한 변화로 인해 연속적으로 발생하는 버스트 에러의 발생 확률은 더욱 낮아진다. 여기에 디인터리빙과 채널 디코딩을 사용하여 시스템의 성능은 더욱 향상된다⁵⁾.

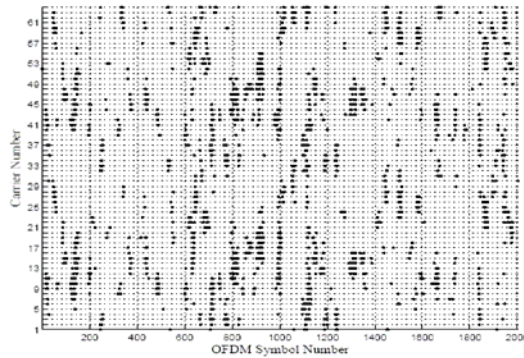
그림 3은 flat 페이딩 채널환경 하에서 서로 다른 순환 시프트 값에 따른 BER과 PER 성능을 나타낸다. 2개의 송신 안테나와 1개의 수신 안테나를 가지는 OFDM 시스템이고, 부반송파의 개수는 64개, 두 번째 송신안테나의 순환 시프트 값은 각각 $\delta \text{cyc}, l=16$ 과 $\delta \text{cyc}, l=32$ 샘플이며 단말기의 이동 속도는 3km/h이다. QPSK 변조방식과 1/2의 coding rate를 갖는 constraint length 7인 convolutional 코딩을 사용한다. 그림 3을 보면 BER과 PER 모두 $\delta \text{cyc}, l=16$ 샘플을 사용할 때 더 좋은 성능을 나타낸다는 것을 볼 수 있다. 서로 다른 순환 시프트 값은 채널의 서로 다른 주파수 selectivity를 발생시키고 그로 인해 서로 다른 성능을 나타낸다.

서로 다른 순환 시프트 값이 시스템 성능의 차이를 발생시키므로, 최적의 시프트 값을 얻는 것은 매

우 중요하다. 식 (2)를 통해 순환 시프트 값을 구하는 방법을 분석할 수 있다.



(a)



(b)

그림 2. 시스템의 에러 분포도. (a) CDD 를 사용한 경우 (b) CDD 를 사용하지 않은 경우

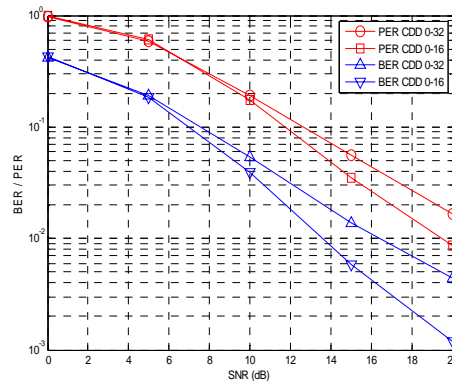


그림 3. Cyclic delay 값에 따른 BER 과 PER 성능.

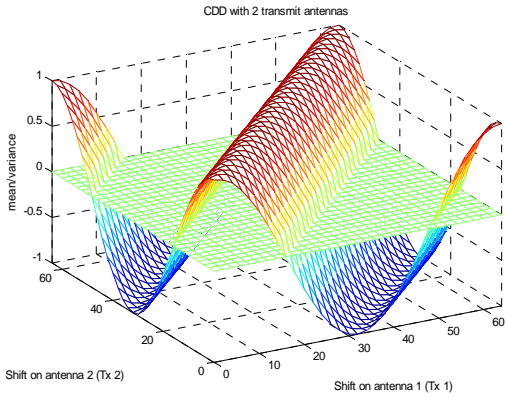


그림 4. 두 개의 송신 안테나를 갖는 송신 신호의 평균과 분산.

그림 4는 서로 다른 순환 시프트 값을 갖는 송신 신호의 평균값과 분산 값의 예를 보여준다. 두개의 안테나 모두 $0 \leq \delta_{cyc,n} \leq N_{FFT}$, $n = 1, 2$ 의 범위를 만족한다. 평균값은 일정한 상수 값을 갖고, 분산은 완전한 대칭 값을 갖는다. 가장 큰 다이버시티를 나타내는 피크점은 두 안테나 사이의 시프트 값의 차이가 최대일 때 얻게 된다.

$$\Delta_{optimal} = |\delta_{cyc,1} - \delta_{cyc,2}| = 32 \quad (3)$$

그러므로 시스템의 성능은 안테나1과 안테나2의 상대적인 시프트 값에 영향을 받게 된다. 하지만, 이러한 해석은 단순히 식 (2)에 의존한 해석이다. 식 (2)는 시간에 따라 변화하는 채널의 영향에 대해 고려하지 않았다. 만약, 인터리빙과 채널의 영향에 대해 고려하게 된다면 그림 4의 피크점 위치가 바뀌게 될 것이다. 즉, 최적의 지연 값을 계산하기 위해서는 모든 시스템 파라미터와 채널 환경의 영향을 포함해야 한다.

III. Closed-Loop MIMO 선형 프리코딩

더 높은 전송 속도와 더 좋은 시스템 성능에 대한 끊임없는 수요의 증가를 만족시키기 위한 차세대 무선 네트워크의 해결책으로 OFDM과 MIMO 시스템의 결합이 대두되고 있다. MIMO 시스템에서 채널 상황 정보를 사용하여 성능을 향상시키는 효과적인 방법 중 한 가지는 선형 프리코딩을 이용하는 방법이다. 선형 프리코딩은 input shaper와 pre-beam 전력 할당을 가지는 multi-mode beamformer의 결합으로 작동한다⁶⁾.

프리코딩 행렬의 SVD (singular value decomposition)를 고려하면 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{U}_F \mathbf{D} \mathbf{V}_F^H \quad (4)$$

여기서, singular 벡터 \mathbf{U}_F 는 각각의 열이 beam direction을 나타내는 직교성을 갖는 beam direction 행렬이다. Beam 전력 loading은 singular value \mathbf{D} 의 제곱인 \mathbf{D}^2 이 된다. \mathbf{V}_F 는 input shaping 행렬을 나타낸다. 전체 송신 전력을 유지하기 위해서는 식 (5)를 만족해야 한다.

$$\text{tr}(\mathbf{F} \mathbf{F}^H) = 1 \quad (5)$$

$\text{tr}(\mathbf{X})$ 는 행렬 \mathbf{X} 의 대각 값들의 합을 나타낸다. 따라서 식 (5)는 모든 beam 들의 전력의 합은 상수여야 한다는 것을 나타낸다.

codeword \mathbf{c} 를 만들어 내는 인코더와 송신기에서의 프리코딩 행렬 \mathbf{F} 를 고려하면 수신기에서의 수신 신호는 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{c} + \mathbf{n} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{H} 는 MIMO 채널 행렬, \mathbf{n} 은 분산 σ^2 을 갖는 AWGN의 벡터를 의미한다. 수신단은 프리코딩 행렬 \mathbf{F} 를 알고 있고, 실질적인 채널 행렬 $\mathbf{H} \mathbf{F}$ 를 사용하여 송신된 codeword \mathbf{c} 를 추정할 수 있다.

IV. 제안된 CDD-OFDM을 위한 선형 프리코딩

다중사용자 MIMO에서 하향링크 시, 송신단에 spatial multiplexing 기법을 적용하게 되면, 독립적인 신호들이 병렬로 전송되면서 사용자간의 interference가 발생하게 된다. Zero-forcing (ZF), minimum mean square error (MMSE) 또는 decision-feedback detection (DFE) 등과 같은 검출 알고리즘을 사용할 때 또한 각 사용자는 자신의 채널행렬 값을 알기 때문에 적용하는데 어려움이 있다. 이러한 적용적인 어려움을 해결하기 위해 각각의 사용자가 채널정보를 송신단으로 feedback 하여 송신기에서 채널을 compensation 해주는 프리코딩을 사용한다.

2장에서 설명한 바와 같이 CDD나 STBC와 같이 여러 개의 송신 안테나를 사용하는 신호 전처리 (pre-processing) 기법은 매우 큰 다이버시티 이득을 얻는다. 일반적으로, 전체 송신 전력은 제한되어 있기 때문에 채널상황이 좋지 않은 사용자는 성능 열

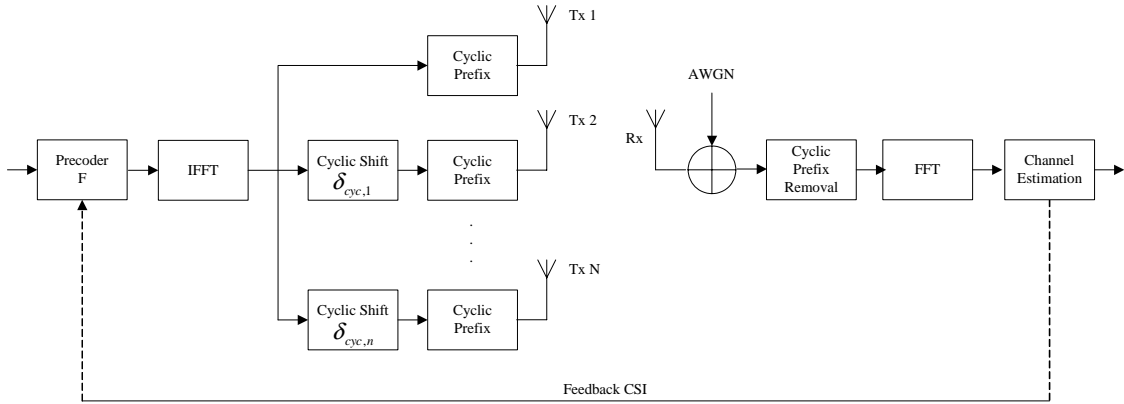


그림 5. 제안된 프리코딩을 적용한 단일사용자 CDD-OFDM 시스템의 구조

화가 발생하게 된다. 송신 전력을 증가시키지 않고 추가적인 이득을 얻기 위하여, 우리는 선형 프리코딩과 다중사용자 MIMO에서의 CDD-OFDM 시스템과의 결합기법을 제안한다. 이러한 제안된 시스템 모델에서 프리코딩은 noise와 사용자간의 interference로 인한 채널의 변동 진폭을 감소시킨다. 이후, 좋지 않은 채널 상황에 있는 특정 사용자에게는 송신안테나에 CDD 기술을 사용한다. 그림 5는 CDD를 사용하는 단일사용자의 MISO sub-system 모델로서 FDD를 사용하는 CDD-OFDM에 적용한 구조도이다. 제안된 기법을 TDD를 사용하는 CDD-OFDM에 적용할 시에는 채널 상황 정보 feedback을 사용하지 않고, 그 대신에 BS에서 측정된 상향링크 채널의 정보를 하향링크 채널에 정보를 전송할 때 그대로 사용한다. 즉, 채널가역성을 이용하는 것이다.

그림 5는 단일사용자를 고려한 것으로 주기적인 시프트로 인해 MISO 채널이 가상의 selectivity 한 SISO 채널로 전환되기 때문에, CDD-OFDM 시스템을 위한 프리코딩 기법으로, SISO 채널 주파수 영역에서의 프리코딩 기법을 그대로 사용한다. 채널 코딩과 인터리빙, 심볼 매핑을 거친 송신 신호는 프리코딩 값 F에 의해 프리코딩 된다. FDD 시스템의 채널 상황 정보 feedback을 통해 얻은 프리코딩 값 F는 채널 행렬 H의 함수로 나타낼 수 있다. 단일사용자 sub-system의 등가 프리코딩 값 F는 채널의 변동 진폭을 감소시켜 에러의 양을 감소시키게 되는데 이는 다중사용자 MIMO 시스템에서의 프리코딩 행렬 F와 동일한 효과이다. 식 (6)을 통해 실질적인 채널 행렬은 채널 행렬과 프리코딩 행렬의 곱인 HF가 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 채널 디코딩 이전의 채널 등화(equalization) 성분으로 HF의

추정 값을 사용하게 된다. 식 (7)은 CDD-OFDM과 프리코딩을 결합한 제안된 알고리즘의 수신 신호를 나타낸다.

$$y = \left(\sum_{n=1}^N H_n e^{-j \frac{2\pi}{N_{FFT}} k \delta_{cyc,n}} \right) F_{CDD} S + n$$

$$= H_{CDD} F_{CDD} S + n \quad (7)$$

여기서, S는 cyclic-delay 이전의 송신 codeword, n은 AWGN noise, HCDD는 주기적인 시프트로 인한 가상의 SISO 채널로 변환된 MISO 채널을 나타낸다. 프리코딩 값 F_{CDD}는 추정된 채널 값 H_{CDD-EST}의 역수를 취하여 획득한다.

제안된 시스템에서는 다음의 이유로 인하여 성능 향상을 얻게 된다. 우선, 채널정보를 이용한 프리코딩을 사용함으로써 에러 비트의 수를 줄이게 된다. 이후 2장에서 설명한 바와 같이 CDD를 사용함으로써, 채널의 selectivity를 증가시키게 되어 에러의 분포를 변화시키고, 채널 코딩과 인터리빙을 통해 증가된 채널 selectivity 상황에서 더 큰 코딩 이득을 얻을 수 있다.

Feedback latency를 무시할 수 있고 채널이 완벽히 추정되었다고 가정할 때, 채널의 페이딩으로 인한 영향은 크게 감소하고, 그 결과 AWGN 환경 하에서의 시스템 성능과 대등하게 된다. 그러나 사실상 feedback 정보는 feedback loop의 지연으로 인해 채널 변화에 민감하다. Feedback의 유효성은 이러한 feedback loop 지연과 채널 Doppler spread에 의존하게 된다. 따라서, 다양한 채널 환경 하에서 latency를 고려한 것과 그렇지 않은 것에 대한 제안된 기법의 모의실험 결과는 5장에서 설명한다.

V. 모의실험을 통한 성능 분석

본 장에서는, 제안된 기법에 대한 모의실험 결과를 살펴보고, 기존의 CDD-OFDM 시스템과의 성능을 비교 검증한다. 본 논문의 모의실험에서 사용한 Ped A와 Veh A 채널은 [7]에 정의되어 있다. 표 1은 본 논문의 모의실험 환경에 사용한 주요 파라미터들을 나타낸다.

그림 6은 각각 flat 페이딩 채널, Ped A 채널, Veh A 채널 환경에서 프리코딩을 사용하지 않은 기존의 CDD-OFDM의 BER 성능을 나타낸다. 3km/h의 이동 속도를 갖는 flat 페이딩 채널에서 target BER 10^{-4} 인 경우 19.4dB의 SNR을 갖는다. 이것은 전체 영역에 걸쳐 Ped A 채널 환경에서의 성능과 거의 같은 것을 볼 수 있다. 120km/h의 이동 속도를 갖는 flat 페이딩과 Veh A 채널 환경에서의 성능은 target BER 10^{-4} 에서 각각 13.4dB와 14.6dB의 SNR을 갖는다. 이를 통해 알 수 있는 현상은 주파수 selectivity와 단말기의 이동 속도가 증가하면 시스템의 성능이 증가한다는 것이다. CDD로 인한 이러한 이득은 SFBC(space-frequency block

표 1. 모의실험 파라미터

Parameter	Value
Carrier Frequency [GHz]	2
Systems Bandwidth [KHz]	800
FFT Size	64
Length of Guard Interval	16
Length of Cyclic Dealt [samples]	0, 16
Frame Size [OFDM symbols]	50
Channel Coding	K=3, 1/2 Convolutional Code
Interleaving	Random Interleaving
Modulation	QPSK
Detection	Maximum Likelihood
MIMO Configuration	2 × 1
Fading Channels	Flat / Ped A / Veh A
Mobility [km/h]	3 & 120 for Flat 3 for Ped A 120 for Veh A
Feedback Latency [ms]	5 for FDD 0 for TDD

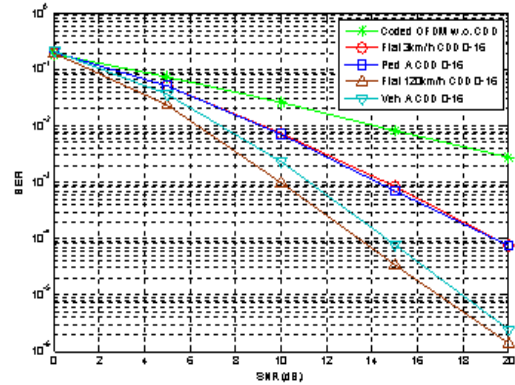


그림 6. 프리코딩을 사용하지 않은 CDD-OFDM의 BER 성능.

coding)에서의 이득과 매우 유사한데⁸⁾, 이는 두개의 다이버시티 기법이 모두 주파수 다이버시티 이득을 이용하기 때문이다.

이동 통신 시스템에서 시간에 따라 빠르게 변화하는 채널로 인해, feedback 기술은 이동 속도, 전송 주파수, 전송 프레임 길이, 그리고 feedback loop 지연에 의존한다. 이러한 요인들의 영향으로 심각한 성능의 열화가 나타나기 때문에 3GPP에서는 다양한 프리코딩 기법들이 연구되고 있다⁹⁾. feedback 기술을 최적화하여 사용하기 위해서는 feedback 정보가 보다 정확해야 한다. 본 논문의 모의실험에서는 IEEE 802.16의 표준화에 정의된 5ms의 프레임 길이를 적용하였다.

그림 7은 제안된 선형 프리코딩을 적용한 CDD-OFDM의 모의실험 결과를 나타낸다. 이번 모의실험에서는 feedback loop의 latency는 고려하지 않았다. 그림 6과 그림 7을 비교해보면, 제안된 기법에서의 성능이

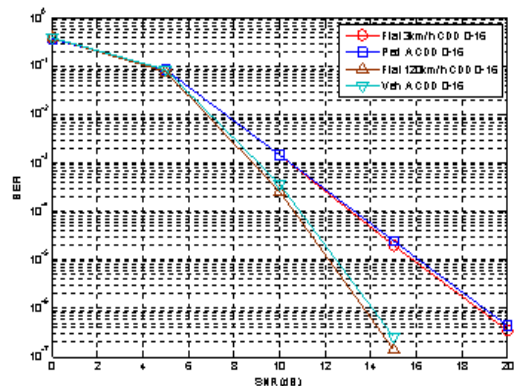


그림 7. Feedback latency를 고려하지 않은 경우의 프리코딩 CDD-OFDM의 BER 성능.

매우 좋아진 것을 확인할 수 있다. Target BER 10^{-4} 에서 3km/h의 이동 속도를 갖는 flat 페이딩 채널과 Ped A 채널 환경에서 각각 6.4dB, 6.2dB의 이득을 얻는 것을 볼 수 있다. 반면에, 120km/h의 이동 속도를 갖는 flat 페이딩 채널과 Veh A 채널 환경에서는 2.7dB, 3.7dB의 이득을 얻는 것을 볼 수 있다. 채널 행렬에 AWGN이 포함되어 있고, 프리코딩 행렬은 채널 행렬의 역수를 취함으로써 얻어 내기 때문에 이러한 부정확한 프리코딩 행렬은 채널의 영향을 완벽하게 제거할 수 없고, 그로 인해 에러 비트가 여전히 남게 된다.

그림 8은 FDD를 사용하는 CDD-OFDM에서 CSI feedback latency를 고려할 때의 성능을 나타낸다. 프레임의 길이는 50개의 OFDM 심볼을 포함하는 5ms로 정하였고, 5ms feedback latency의 최소 값으로 정하였다. 이번 모의실험에서는 BER 성능이 매우 열화되었다. 그림 7과 비교했을 때, target BER 10^{-3} 에서 3km/h의 flat 페이딩 환경에서 9dB의 성능 감소를 보였고, Ped A 채널 환경에서는 10dB의 성능 감소가 나타났다. 120km/h의 flat 페이딩 환경과 Veh A 채널 환경에서는 각각 5.5dB, 5.4dB의 성능 열화를 보였다. 그림 8에 나타난 성능은 심지어 프리코딩을 사용하지 않은 기존의 CDD-OFDM 시스템의 성능보다도 좋지 않은 성능을 보였다.

그림 8을 통해 알 수 있는 결과는 제안된 기법의 성능은 CSI의 정확도에 매우 큰 영향을 받는다는 것이다. 따라서 제안된 기법은 채널의 가역성이 유지될 수 있는 TDD를 사용하는 CDD-OFDM 시스템에 더 적합하다는 것을 알 수 있다. 이러한 채널의 가역성은 송신기가 상향링크에서 측정된 채널의 정보를 하향링크에 적용할 수 있는 성질을 말한다.

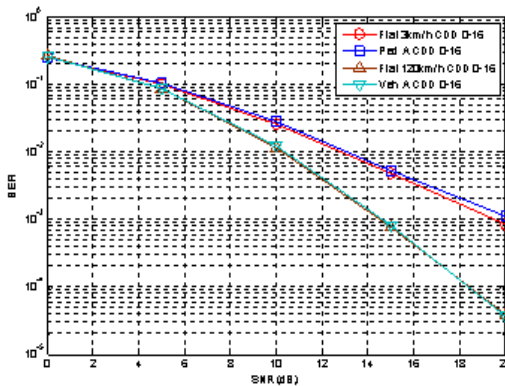


그림 8. FDD 시스템에서 feedback latency를 고려하는 경우의 프리코딩 CDD-OFDM의 BER 성능.

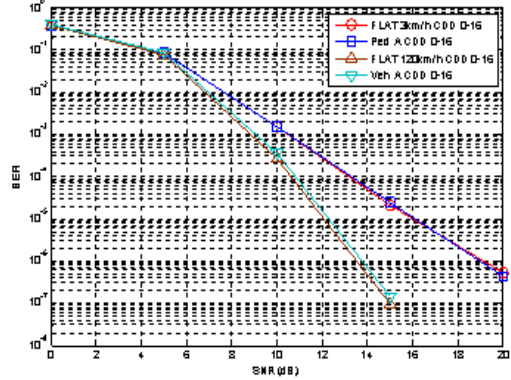


그림 9. TDD 시스템에서 feedback을 사용하지 않고 채널 가역성을 이용한 프리코딩 CDD-OFDM의 BER 성능.

하지만 실질적인 full-duplex 통신에서, 상향링크와 하향링크는 주파수, 시간, 공간 영역에서 똑 같은 값을 갖지 않는다. 그러나 어떠한 영역에서 채널의 분산에 비해 상대적으로 작은 차이를 가질 때 가역성 원리로 인해 똑 같은 값으로 근사화 하여 사용할 수 있다.

그림 9는 TDD를 사용하는 CDD-OFDM 시스템의 모의실험 결과를 보여준다. Feedback을 사용하지 않고 채널 가역성을 이용하여 프리코딩을 적용하였다. 3km/h의 이동 속도를 갖는 flat 페이딩 채널과 Ped A 채널 환경에서 target BER 10^{-4} 에서 각각 13.1dB, 13.2dB의 SNR을 가지고 전 영역에 걸쳐 거의 같은 성능을 나타낸다. 120km/h의 이동 속도를 갖는 flat 페이딩 채널과 Veh A 채널 환경에서는 10.6dB, 10.8dB의 SNR을 갖는다. 그림 7과 비교했을 때 모든 채널 환경의 경우에 거의 같은 성능을 나타낸다. 이것은 TDD를 사용하는 경우에 채널 가역성 원리로 인해 하향링크와 상향링크간의 채널 상태가 매우 비슷하기 때문이다. 이번 모의실험의 결과로 제안된 기법을 TDD를 사용하는 CDD-OFDM에 적용시킬 때 더욱 향상된 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

CDD는 기존의 통신 시스템에서 복잡도를 증가시키지 않고 주파수 다이버시티를 이용할 수 있는 방법이다. 또한, 프리코딩 기법은 시스템의 성능을 증가시키기 위하여 많은 분야에 적용되어 왔다. 본 논문에서는, 기존의 CDD-OFDM 시스템에 선형 프리코딩 기법의 적용을 제한하여 추가적인 프리코딩 이득을 얻을 수 있게 하였다. Feedback latency를

무시할 수 있을 때, 본 논문에서 제안한 기법이 다양한 채널 환경 하에서 기존의 CDD-OFDM 기법보다 높은 이득을 얻는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, FDD를 사용하는 CDD-OFDM의 경우에는 5ms의 feedback latency 만으로도 BER 성능이 열화 되는 것을 볼 수 있다. 반면, TDD를 사용하는 CDD-OFDM 시스템에서는 채널의 가역성이 유지될 때, 본 논문에서 제안한 기법이 시스템의 성능을 향상시키는 것을 볼 수 있다.

참 고 문 헌

[1] A. Dammann and S. Kaiser, "Low complex standard conformable antenna diversity techniques for OFDM systems and its application to The DVB-T system," in *Proc. 4th International ITG Conference on Source and Coding*, Jan. 2002, pp. 253-259.

[2] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J-SAC*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

[3] Ting Du, Bing Hui, and KyungHi Chang, "Block coding techniques with cyclic delay diversity for OFDM systems," *KICS Journal*, vol. 33, No. 9, pp. 867-873, Sep. 2008.

[4] M. Bossert, A. Huebner, F. Schuehlein, H. Haas, and E. Costa, "On cyclic delay diversity in OFDM based transmission schemes," in *Proc. OFDM Workshop*, Sep. 2002.

[5] G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WIMAX-Understanding Broadband Wireless Networks*. Prentice Hall. USA : NJ, 2007.

[6] Mai Vu and Arogyaswami Paulraj, "MIMO wireless linear precoding," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, pp. 86-105, Sep. 2007.

[7] Recommendation ITU-R M.1225, Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000. 1997.

[8] Insoo Sohn, Heesoo Lee, and Jae Young Ahn,

IEEE C802.20-03/49, "Comparison of SFBC and STBC for transmit diversity in OFDM system," May 2003.

[9] A. Hottinen, O. Tirkkonen, and R. Wichman, *Multi-antenna Transceiver Techniques for 3G and Beyond*. Wiley & Sons, Inc., 2003.

휘 빙 (Bing Hui)

준회원



2005년 7월 중국 동북대학교 정보통신공학과 (공학사)
2007년 9월~현재 인하대학교 정보통신 대학원 석사과정
<관심분야> OFDM/MIMO Systems, MIMO Detection Algorithm, WiMAX, 3GPP LTE

김 영 범 (YoungBum Kim)

준회원



2008년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 3월~현재 인하대학교 정보통신 대학원 석사과정
<관심분야> 4세대 이동통신 시스템, WiMAX 및 3GPP LTE 동기화 기술, Ad-hoc Network

장 경 희 (KyungHi Chang)

중신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 8월 Texas A&M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원

주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)
2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
<관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative Relaying System, RFID/USN Systems